干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.03.16

雪岭云杉林叶片碳氮化学计量特征及其与土壤理化因子的关系①

李晓菲[1,2]， 李　路[1,2]， 常亚鹏[1,2]， 许仲林[1,2]

（1　新疆大学资源与环境科学学院，新疆　乌鲁木齐　830046；
2　新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室，新疆　乌鲁木齐　830046）

摘　要： 碳(C)、氮(N)对于植物生长和生理调节机能意义重大。研究雪岭云杉林叶片C、N化学计量特征随土壤理化因子的变化特征，对于认识森林生态系统的分布格局和未来变化趋势具有重要意义，为进一步探讨全球变化对植物的影响提供科学依据。以雪岭云杉林叶片为研究对象，利用统计分析探究叶片C、N化学计量的变化特征，并利用冗余分析(Redundancy analysis，RDA)技术对叶片C、N化学计量特征与土壤理化因子的关系进行研究。研究结果表明，叶片C含量的平均值为465.28 $g \cdot kg^{-1}$，变异系数为14%；叶片N含量的平均值为6.54 $g \cdot kg^{-1}$，变异系数为42%；土壤C/N的平均值为90.63，变异系数为82%。冗余分析的结果表明，在0~30 cm层中，叶片C、N化学计量特征主要受到土壤含水量和pH的驱动，土壤含水量与叶片C/N之间呈正相关关系，与叶片C、N含量之间呈负相关关系；pH与叶片C、N含量成正比，与C/N成反比；在30~80 cm层中，土壤含水量和土壤粘粒含量是影响叶片C、N化学计量特征的主要因素，土壤含水量和叶片C/N之间呈正比，土壤粘粒含量与C、N含量之间呈正比，与叶片C/N之间呈反比；pH、土壤C、N含量对叶片C、N化学计量特征的影响不显著。

关 键 词： 雪岭云杉林；冗余分析；化学计量特征；理化因子

文章编号： 1000-6060(2019)03-0599-07(0599~0605)

探究植物生产循环过程中碳(C)、氮(N)、磷(P)的相互关系有助于深入了解生态系统的循环过程[1]。近几年来，许多学者针对不同的时间和空间尺度上的多种生态系统元素的生态化学计量特征进行了较为细致的研究[2]。由于气候变化可能影响生物地球化学过程，因此，相关研究开始重视生态系统组分的元素含量及其生态化学计量比对气候等条件变化的响应[3]。在植物的生长发育过程中，C和N作为促进植物新陈代谢过程和植物体构建的重要元素[4]，与P元素共同参与了碳水化合物、酶、纤维素等代谢过程[5]。在一定的区域范围内，植物C和N元素能够反映其与环境之间的相互关系。相关研究表明，植物生长过程会受到C和N元素的共同影响[6]，而影响植物生长的主要元素是由C∶N的大小所决定的，当然也与外界环境有一定的关系。

目前，相关学者已对大区域尺度上植物与土壤C、N、P化学计量特征之间的关系进行了研究，其揭示了生物质化学循环过程中的养分迁移规律以及生态系统内植物养分的限制情况[7]，分析了生态化学计量特征与温度和降水的关系[8-9]。王春节等人的研究结果表明，植物C和N与土壤含水量、土壤C∶N、土壤容重之间存在相关关系[10]，但针对不同土壤层理化因子与植物生态化学计量特征关系的研究较少，限制了环境因子对干旱区植物生态化学计量特征影响的研究。本文以雪岭云杉林叶片为研究对象，利用统计分析探究了叶片C、N化学计量的变化特征，并通过冗余分析(Redundancy analysis，RDA)探究叶片C、N化学计量特征与土壤理化因子之间的相关关系，揭示雪岭云杉林的生态适应性，为探究干旱区植物生态化学计量特征的探究奠定基础。

①　**收稿日期：** 2018-11-21；　**修订日期：** 2019-02-21
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(41361098，31500398)；自治区研究生科研创新项目(XJGRI2017009)
作者简介： 李晓菲(1992-)，女，新疆博乐人，硕士研究生，主要方向为环境与气候建模. E-mail:lxf_0306@163.com
通讯作者： 许仲林，男，博士，副教授，主要研究方向为GIS与环境建模. E-mail:galinwa@gmail.com

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

天山位于亚洲的中部,山脉为东西走向,东西长近4 000 km,南北宽约150 km。天山处于准格尔盆地和塔里木盆地的中间位置,年均气温为3.1 ℃,并且年均温度差较大,年均降水量在400~600 mm,多集中在5~9月份。天山北坡海拔1 600~2 800 m的空间形成是以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林为主的针叶林景观,林下土壤类型为山地森林灰褐色土。

1.2 数据采集与实验分析

本研究选取乌鲁木齐等6个天山雪岭云杉林分布区,于2015—2016年的6~8月份进行土壤样本采集(图1)。在各样地选择1~3个海拔梯度连续的坡面,按照50 m海拔高度间隔进行采样。在每一个海拔高度上设置20 m×20 m的采样样方,在样方内"S"型选取3个采样点采集0~80 cm的土壤样本,将土壤样本分层混合均匀装入自封袋,并均匀采集样点周边健康的雪岭云杉林叶片样本。并利用GPS记录每个样方的海拔高度和经纬度信息。将野外采集的土壤样本带回实验室自然风干,磨细后通过0.149 mm的孔径筛。将植物叶片样本在105 ℃的温度下烘干24 h,并用粉碎机粉碎过筛。土壤和叶片C采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;全N采用凯氏定氮仪测定[11]。

1.3 数据处理

本研究利用Excel 2010对数据进行整理并做基础统计分析,采用SPSS 22.0对数据进行多元线性回归分析。将叶片的C、N含量作为研究对象,结合土壤理化因子数据(数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn),利用冗余分析(Redundancy Analysis,RDA)分析叶片C、N与环境变量的关系。其中,各层(0~30 cm和30~80 cm)土壤C、N含量、土壤含水量、电导率与pH的变异膨胀系数均小于临界值(临界值为20),说明可将其作为环境因子进行分析比较。叶片C、N含量的除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis,DCA)表明排序轴梯度长度LGA<3,即叶片与环境之间为线性关系,适合线性排序法,可以用RDA进行分析。

2 结果分析

2.1 植物叶片C、N的变化特征

由表1知,叶片C、N含量的平均值分别为465.28、6.54 g·kg^{-1},变异系数为14%、42%;C/N的平均值为90.63,变异系数为82%。C、N与C/N的变异系数相对较大,说明叶片C、N含量具有很强的变异性。研究表明,叶片C元素与N元素之间没

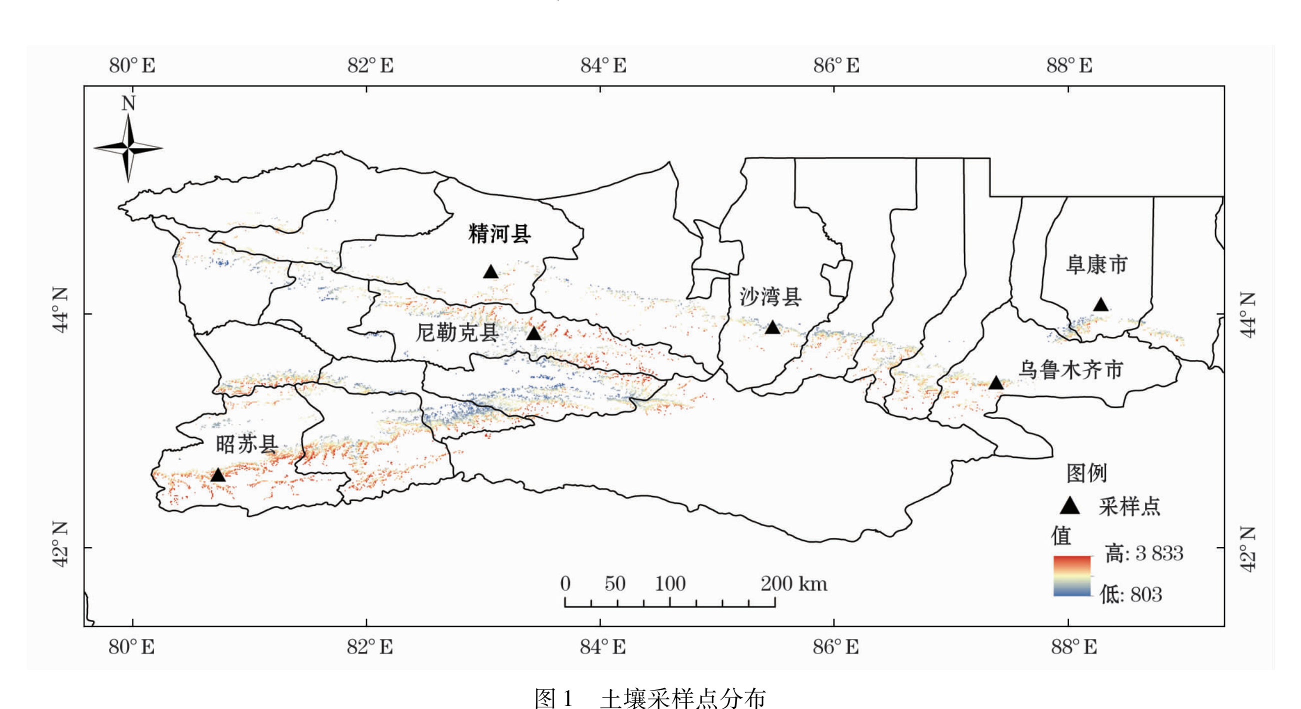


图1 土壤采样点分布

Fig. 1 Soil sampling locations in study area

表 1　叶片 C 和 N 的统计分析

Tab. 1　Classical statistical analysis of leaf C and N

项目	平均	中值	标准偏差	范围	变异系数
C /g · kg^{-1}	465.28	467.39	66.75	321.90 ~ 598.96	0.14
N /g · kg^{-1}	6.54	6.18	2.72	0.69 ~ 17.06	0.42
C/N	90.63	73.63	74.67	28.49 ~ 579.98	0.82

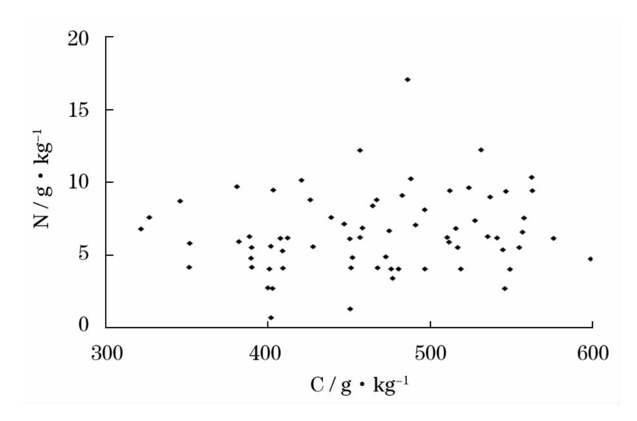


图 2　叶片 C、N 含量的相关性

Fig. 2　Relationship of leaf C and N contents

有显著的相关性(图 2)。

2.2　叶片 C、N 含量与土壤理化因子的相关性

叶片 C、N 含量对土壤理化因子有一定的响应。利用数量生态学的 RDA 技术分析各层土壤 C、N、土壤含水量、电导率、pH 与叶片 C、N 化学计量特征的相关关系。0 ~ 30 cm 层中,叶片 C、N 化学计量特征在第Ⅰ轴和第Ⅱ轴的解释量分别为 67.70% 和 2.60%,前两轴的解释量之和为 70.30%,对叶片 C、N 化学计量特征和影响因子关系的累计解释量高达 99.40%,说明前两轴即可较好地说明叶片 C、N 化学计量特征与土壤理化因子间的关系,且主要取决于第Ⅰ轴(表 2)。30 ~ 80 cm 层中,叶片 C、N 化学计量特征在第Ⅰ轴和第Ⅱ轴的解释量分别为50.5%和 0.2%,前两轴的解释量之和为 50.7%,对叶片 C、N 化学计量特征和影响因子关系的累计解释量为 95.90%,说明前两轴即可较好地说明叶片 C、N 化学计量特征与土壤理化因子间的关系,同样取决于第Ⅰ轴(表 2)。

图 3 为土壤理化因子对叶片 C、N 化学计量特征影响的排序。由图 3a 可以看出,在 0 ~ 30 cm 层中,土壤含水量和 pH 箭头的连线最长,说明土壤含水量和 pH 对叶片 C、N 化学计量特征变异的影响较大。土壤含水量与叶片 C/N 呈正相关关系,与叶片 C、N 含量呈负相关关系;pH 与叶片 C、N 含量呈正比,与叶片 C/N 呈反比。土壤含水量与叶片 C、N 含量之间的相关性最大。

表 2　叶片 C、N 化学计量特征的变化解释变量冗余分析

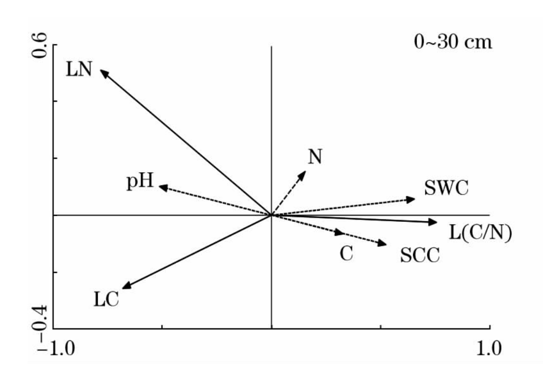
Tab. 2　RDA of stoichiometric characteristics of leaf C and N

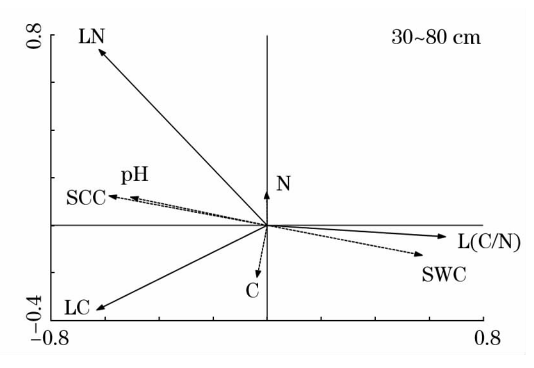
排序轴	土层深度 / cm	第Ⅰ轴	第Ⅱ轴	第Ⅲ轴	第Ⅳ轴
特征值 / %	0 ~ 30	67.70	2.60	0.50	0.10
	30 ~ 80	50.50	0.20	0.05	0.00
叶片 C、N 化学计量特征	0 ~ 30	0.55	0.24	0.27	0.32
与土壤理化因子的相关性	30 ~ 80	0.43	0.51	0.34	0.21
化学计量特征累计	0 ~ 30	67.70	69.30	70.70	71.20
解释量 / %	30 ~ 80	50.50	63.60	65.20	65.40
化学计量特征与土壤理	0 ~ 30	98.20	99.40	100.00	0.00
化因子累计解释量 / %	30 ~ 80	93.80	95.90	97.80	100
典型特征值	0 ~ 30	0.71			
	30 ~ 80	0.65			
总特征值	0 ~ 30	1			
	30 ~ 80	1			

从图 3b 可以看出,在 30 ~ 80 cm 层中,土壤含水量和土壤粘粒含量箭头的连线最长,因此土壤含水量和土壤粘粒含量对叶片 C、N 化学计量特征变异的影响较大。土壤含水量和叶片 C/N 呈正相关关系,与其他化学计量特征值呈负相关关系;pH、土壤粘粒含量、土壤 C 和 N 含量与叶片 C、N 含量呈正比,与叶片 C/N 呈反比。

在排序图中,实线为叶片 C、N 化学计量特征,虚线为土壤理化因子;连线的长度为叶片 C、N 化学计量特征与土壤理化因子的大小关系, 两个箭头连线之间的夹角为叶片 C、N 化学计量特征与土壤理化因子相关关系的大小。

由此可知,0 ~ 30 cm 和 30 ~ 80 cm 层的土壤理化性质对叶片 C、N 化学计量特征影响的差异性显著。进一步对不同土壤层的理化因子做 Monte-Carlo 检验,其重要性排序如表 3 所示。0 ~ 30 cm 土壤层理化因子对叶片 C、N 化学计量特征的重要性排序由大到小依次为:土壤含水量、pH、土壤粘粒含量、土壤 C 含量、土壤 N 含量,其中土壤含水量对叶片 C、N 化学计量特征的影响极显著($P = 0.001$),pH 对叶片 C、N 化学计量特征的影响显著($P = 0.05$);土壤粘粒含量、土壤 C 含量和土壤 N 含量对叶片 C、N 化学计量特征的影响不显著。30 ~ 80 cm 土壤层理化因子对叶片 C、N 化学计量特征的重要性排序由大到小依次为:土壤含水量、土壤粘粒含





注：LC：叶片碳含量 Leaf C；LN：叶片氮含量 Leaf N；L(C/N)：叶片碳氮比；C：土壤碳含量；N：土壤氮含量；SWC：土壤含水量 Soil water content；SCC：土壤粘粒含量 Soil clay content

图 3　叶片 C、N 含量与土壤理化因子(0~30 cm 和 30~80 cm)关系的冗余分析二维排序图

Fig. 3　Bidimensional ordering chart of the RDA of relationships of contents of leaf C and N with physicochemical factors in 0~30 cm and 30~80 cm

表 3　0~30 cm 和 30~80 cm 层土壤理化因子与排序轴的相关性

Tab. 3　Correlation of soil physicochemical factors with the axes in 0~30 cm and 30~80 cm

土层深度 / cm	土壤理化因子	重要性排序	*F*	*P*
0~30	土壤含水量	1	12.25	0.001
30~80	土壤含水量		9.52	0.002
0~30	pH	2	9.13	0.05
30~80	土壤粘粒含量		7.21	0.04
0~30	土壤粘粒含量	3	3.23	0.052
30~80	pH		2.16	0.714
0~30	土壤碳含量	4	2.46	0.243
30~80	土壤碳含量		0.88	0.350
0~30	土壤氮含量	5	0.19	0.666
30~80	土壤氮含量		0.46	0.402

量、pH、土壤 C 含量、土壤 N 含量，其中土壤含水量对叶片 C、N 化学计量特征的影响极显著($P<0.01$)，土壤粘粒含量对叶片 C、N 化学计量特征的影响显著($P<0.05$)。

3　讨论

植物通过土壤供给的养分，为叶片生长提供所需要的营养物质。因此，土壤理化性质的变化对叶片 C、N 化学计量特征变异有重要的影响。李玉霖等人对中国北方植物叶片化学计量特征的研究表明土壤含水量与植物叶片含量有显著的相关性[12-13]。李红林等人认为土壤水分对植物发育过程有直接的影响[14]。本研究表明 0~30 cm 和 30 ~ 80 cm 层中土壤含水量均对叶片 C、N 化学计量特征有重要的影响，与上述结果相一致。相关研究表明，植物中的 C、N 等元素主要来源于土壤[15-17]，植物吸收营养元素的多少取决于土壤中水分和养分的含量。土壤含水量影响着植物的生长[18]。本研究区范围较广且地形复杂，地形的改变影响了土壤水分，而土壤水分决定着土壤、植被以及群落的演替过程[19-20]，其影响生态系统中的水热平衡。因此，植物叶片 C、N 化学计量特征与土壤水分条件密切相关。土壤 pH 受土壤中氢离子浓度的影响，氢离子浓度越高，酸性越强，反之碱性越强。其反映了土壤微生物的活动、有机质的合成与分解的能力[21]。土壤 pH 通过影响土壤养分的分布和变化情况，进而影响植物的生长发育过程[22-24]。徐开杰等人研究表明土壤 pH 主要通过对土壤物理、化学及生物特性的影响而影响植物生长[25]。赛迪古丽等人认为土壤 pH 影响植物的外观形态和生长发育[26]。本研究中 0~30 cm 层中土壤 pH 与植物叶片的生长密切相关，这可能与研究区降水差异大，使得 0~30 cm 层土壤受到淋溶作用不同有关。降雨量增加，淋溶作用加强，土壤中吸附的 H^+ 数据增加[27-28]，使得土壤酸性增加，反之土壤碱性增加。因此，0~30 cm 层土壤 pH 是影响叶片 C、N 化学计量特征的因素之一。30~80 cm 层土壤受到降水淋溶作用小，盐碱程度差距不大，且空间差异性较小，因此，30~80 cm 层土壤 pH 对叶片 C、N 化学计量特征的影响不大。植物与土壤在地球化学循环之间存在相关关系，植物中养分的主要来源是土壤。一些研究表明，土壤粘粒含量与土壤通透性、土壤养分含量等密切相关[29-31]。相比于 0~30 cm 层，30~80 cm 层土壤粘粒含量的

差异性较大,因此 30 ~ 80 cm 层土壤粘粒是影响叶片 C、N 化学计量特征的因素之一。

土壤 C、N 含量对叶片 C、N 化学计量特征的影响均未达到显著水平。利用冗余分析技术研究土壤含水量、土壤粘粒含量、pH、土壤 C、N 含量对叶片 C、N 化学计量特征的影响,进而了解干旱区的森林生态系统内稳性。但对土壤含水量、土壤粘粒含量、pH、土壤 C、N 含量与叶片 C、N 化学计量特征进行独立分析存在一定的缺陷,土壤理化因子对叶片 C、N 化学计量特征的影响并非独立,且土壤理化因子之间也有相互影响与制约关系。因此,在进一步的研究中,应分析土壤理化因子之间对叶片 C、N 化学计量特征的双重或多重影响,使得研究结果更加精确、合理。

雪岭云杉林作为天山森林的单一优势树种,其生长发育与分布状况对天山森林群落结构的构成有重要的作用。研究雪岭云杉林叶片 C、N 化学计量特征与土壤理化因子之间的关系,有助于了解环境对其群落发展的影响,进而为生态系统的可持续发展做贡献。

4 结 论

(1) 叶片 C 含量的平均值为 465.28 $g \cdot kg^{-1}$、变异系数为 14%,叶片 N 含量的平均值为 6.54 $g \cdot kg^{-1}$,变异系数为 42%;C/N 的平均值为 90.63,变异系数为 82%。

(2) 在 0 ~ 30 cm 土壤层中,土壤含水量和 pH 是影响叶片 C、N 化学计量特征的主要因素,且 C、N 含量与土壤含水量成反比,与 pH 成正比;C/N 与土壤含水量成正比,与 pH 成反比。

(3) 在 30 ~ 80 cm 土壤层中,叶片 C、N 化学计量特征主要受土壤含水量和土壤粘粒含量的影响,C/N 与土壤含水量和土壤粘粒含量存在相关关系,土壤粘粒含量与 C、N 含量成正比

(4) 在 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 80 cm 土壤层中,pH、土壤 C、N 含量均未对叶片 C、N 化学计量特征产生显著的影响。

参考文献(References)

[1] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2010, 3(6):540 – 550.

[2] 李征,韩琳,刘玉虹,等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10):1054 – 1061. [LI Zheng, HAN Lin, LIU Yuhong, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10):1054 – 1061.]

[3] HE M, DIJKSTRTA F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: A meta-analysis[J]. New Phytologist, 2014, 204(4): 924.

[4] WAAL D B V D, VERSCHOORA M, VERSPAGEN J M, et al. Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2010, 8(3):145 – 152.

[5] ELSERJ J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. New Phytologist, 2010, 186(3): 593 – 608.

[6] CLELAND E E. Nutrient co-limitation of primary producer communities[J]. Ecology Letters, 2011, 14(9):852 – 862.

[7] 孙美美,关晋宏,岳军伟,等. 黄土高原西部针叶林植物器官与土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 202 – 208. [SUN Meimei, GUAN Jinhong, YUE Junwei, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry in plant organs and soil of coniferous forests on the western Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):202 – 208.]

[8] 卢同平,张文翔,牛洁,等. 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 682 – 692. [LU Tongping, ZHANG Wenxiang, NIU Jie, et al. Study on spatial variability and driving factors of stoichiometry of nitrogen and phosphorus in soil of typical natural zones of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3):682 – 692.]

[9] 任运涛,徐翀,张晨曦,等. 贺兰山青海云杉针叶 C、N、P 含量及其计量比随环境因子的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 185 – 191. [REN Yuntao, XU Chong, ZHANG Chenxi, et al. Variations in leaf C, N, P and stoichiometric of *Picea crassifolia* along the environmental gradient in Helan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6):185 – 191.]

[10] 王春杰,朱志梅,张仁慧,等. 陕北榆林地区沙漠化土壤理化性质、土壤酶活性及其与植物 C, N 的关系[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5):57 – 62. [WANG Chunjie, ZHU Zhimei, ZHANG Renhui, et al. Relations of soil physicochemical properties and soil enzyme activities with plant C and N in Yulin area of north Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(5):57 – 62.]

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000. [BAO Shidan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[12] ZHAO N, HE N, WANG Q, et al. The altitudinal patterns of leaf

C∶N∶P stoichiometry are regulated by plant growth form, climate and soil on Changbai Mountain, China[J]. Plos One, 2014, 9(4): e95196.

[13] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1716－1725. [LI Yulin, MAO Wei, ZHAO Xueyong, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2010, 31(8): 1716－1725.]

[14] 李红林,贡璐,朱美玲,等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345－1355. [LI Honglin, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1345－1355.]

[15] 刘旻霞,车应弟,李俐蓉,等. 甘南高寒草甸微地形上植物叶片特征与环境因子的冗余分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2473－2480. [LIU Minxia, CHE Yingdi, LI Lirong, et al. Redundancy analysis of leaf traits and environmental factors of alpine meadow in Southern Gansu Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2473－2480.]

[16] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377－385.

[17] HAO X M, LI W H, XIANG H, et al. Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 178－186.

[18] 刘旻霞,王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 259－265. [LIU Minxia, WANG Gang. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(2): 259－265.]

[19] 刘育红,魏卫东,杨元武,等. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J]. 西北农业学报, 2018, 27(4): 480－490. [LIU Yuhong, WEI Weidong, YANG Yuanwu, et al. Redundancy analysis on relationships between grassland vegetation and soil factors on degraded alpine meadow[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(4): 480－490.]

[20] 郑丽婷,苏田,刘翔宇,等. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 343－351. [ZHENG Liting, SU Tian, LIU Xiangyu, et al. Species, functional, structural diversity of typical plant communities and their responses to environmental factors in Miao Archipelago, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 343－351.]

[21] 宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. [Song Juanli. The characteristics and evaluation on soil quality of grassland in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.]

[22] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001.

[23] ZHAN X, YU G, HE N. Effects of plant functional types, climate and soil nitrogen on leaf nitrogen along the north-south transect of eastern China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2013, 4(2): 125－132.

[24] 唐琨,朱伟文,周文新,等. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J]. 作物研究, 2013, 27(2): 207－212. [TANG Kun, ZHU Weiwen, ZHOU Wenxin, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. Crop Research, 2013, 27(2): 207－212.]

[25] 徐开杰,史丽丽,王勇锋,等. 水培条件下 pH 值对柳枝稷幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7690－7698. [XU Kaijie, SHI Lili, WANG Yongfeng, et al. Effect of the pH value on switchgrass seedling growth and development in hydroponics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7690－7698.]

[26] 赛迪古丽·哈西木,海米提·依米提. 于田绿洲土壤 pH 值的空间异质性及其对芦苇生长的影响研究——以喀尔克乡为例[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 9－15. [SAYDIGUL Haxim, YIMIT Hamid. Spatial variability of soil pH value and its effects on the growth of phragmites australis in Keriya Oasis: Taking Karki Village as an example[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2012, 31(2): 9－15.]

[27] 刘贤德,赵维俊,张学龙,等. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 pH 变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1013－1020. [LIU Xiande, ZHAO Weijun, ZHANG Xuelong, et al. Variation of soil nutrient content and pH value under *Picea crassifolia* forest in the Pailugou Drainage Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1013－1020.]

[28] 苏凯文,陈路红,郑伟,等. 云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 136－146. [SU Kaiwen, CHEN Luhong, ZHENG Wei, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Myrica nana* in Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 136－146.]

[29] 桑巴叶,朱玉伟,刘康,等. 伊犁河谷不同森林模式下土壤的养分特征和粒径组成[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 328－332. [SANG Baye, ZHU Yuwei, LIU Kang, et al. Soil nutrients properties and particle size composition under different forest pattern in Ili River Valley[J]. Bulletin of Soil and Water Comservation, 2017, 37(5): 328－332.]

[30] 杨阔,黄建辉,董丹,等. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 17－22. [YANG Kuo, HUANG Jianhui, DONG Dan, et al. Canopy leaf N and P stoichiometry in grassland communities of Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 17－22.]

[31] 王晶苑,王绍强,李纫兰,等.中国四种森林类型主要优势植物的C∶N∶P化学计量学特征[J].植物生态学报,2011,35(6):587-595.[WANG Jingyuan,WANG Shaoqiang,LI Renlan, et al. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(6):587-595.]

Stoichiometric characteristics of leaf C and N and their correlation with soil physicochemical factors in *Picea Schrenkiana* forests

LI Xiao-fei[1,2], LI Lu[1,2], CHANG Ya-peng[1,2], XU Zhong-lin[1,2]

(1 *College of Resource and Environmental Science*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *Xinjiang*, *China*;
2 *Key Laboratory of Oasis Ecology*, *College of Resource and Environmental Science*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: Carbon (C) and nitrogen (N) play important roles in plant growth and physiological functions. Study of the relationship between the C and N content in leaves of a plant and its environmental factors contributes to elucidating the supply of plant nutrients and plant growth in different environments which is of great significance to understand the distribution pattern of forest ecosystems and the trend of future changes, and even the response of plants to global change. This paper took the leaves of *Picea schrenkiana* (Schrenk's spruce) forests and the corresponding soil of the trees as the study objects. With samples collected from the field, we retrieved the C and N contents in the leaves and analyzed different soil layers. Then we evaluated the variation of C and N stoichiometric characteristics through statistical analysis. Finally, the redundancy analysis (RDA) was used to investigate the relationships between the stoichiometric characteristics of C and N from the leaves and the soil physicochemical factors. The results showed that the average concentrations of C and N in the leaf were 465.28 $g \cdot kg^{-1}$ and 6.54 $g \cdot kg^{-1}$ respectively, and the variation coefficient were 14% and 82% respectively. The RDA showed that in the soil layer from 0 to 30 cm the stoichiometric characteristics of C and N in the leaf were mainly affected by soil water content and its acidity-alkalinity. For the soil water content, there was a positive correlation with the C/N ratio but a negative correlation with the C and N content in the leaf while for the acidity-alkalinity of the soil, there was a positive correlation with C and N contents in the leaf but a negative correlation with the C/N ratio. In the soil layer from 30 to 80 cm, the stoichiometric characteristics of C and N in the leaf were mainly affected by soil water content and soil clay content. Specifically, for soil water content, there was a positive correlation with the C/N ratio. For soil clay content, there was a positive correlation with C and N contents but a negative correlation with the C/N ratio. Additionally, there were not significant relationships between pH and the C and N contents in the soil and the leaf's C and N stoichiometric characteristics. The soil water content in different soil layers was related to the stoichiometric characteristics of C and N from the leaf, which indicated that the soil water content had certain effects on nutrient uptake by plants, and that was not related to the soil depth.

Key words: *Picea schrenkiana* forests; redundancy analysis; stoichiometric characteristics; physicochemical factor